

Mesure de coefficient de dilatation thermique de matériaux composites par holographie dynamique

Marc Georges^a, Sébastien Ryhon^b, Cédric Thizy^a, Philippe Lemaire^a

^a Centre Spatial de Liège, Parc Scientifique du Sart Tilman, 4031 Angleur (Liège), Belgique
tél : 32-4-3676668, fax : 32-4-3675613, e-mail : mgeorges@ulg.ac.be

^b Optrion S.A., rue des Chasseurs Ardennais, 4031 Angleur (Liège), Belgique
tél : 32-4-3729333, e-mail : sryhon@skynet.be

ABSTRACT

Une méthode de mesure de coefficient de dilatation thermique par interférométrie holographique est présentée. Nous passerons rapidement en revue le principe de la caméra holographique dynamique utilisée pour la mesure puis nous montrerons l'application à plusieurs cas concrets de R&D industriels. Il s'agit d'éprouvettes simples de matériaux composite et de structures plus complexes alliant ces matériaux à des métaux. La mesure consiste à observer le déplacement différentiel entre la partie supérieure de l'objet étudié et une plaque de base sur laquelle il est posé et ce lorsqu'un échauffement ou refroidissement de l'ensemble est opéré.

I. Introduction

L'interférométrie holographique est une technique permettant de mesurer des déplacements allant de typiquement 10 nm à 25-30 microns. Elle est appliquée ici à la détermination du coefficient de dilatation thermique (CTE). Le CTE est défini comme le rapport de l'élongation ($\Delta l/l$) de l'objet de longueur l à la variation de température ΔT que subit cet objet. Le déplacement mesuré lors d'un changement de température est donc donné par

$$\Delta l = CTE \cdot l \cdot \Delta T$$

Pour un CTE et une longueur donnés, il faut donc élever la température ΔT de l'objet de manière telle que le déplacement soit mesurable par interférométrie.

La méthode consiste à observer l'objet posé sur une surface de référence et de mesurer par interférométrie holographique la différence des déplacements entre le sommet de l'objet et cette référence lorsqu'une élévation de température a lieu. La caméra holographique utilisée est basée sur un support d'enregistrement holographique dynamique (cristal photoréfractif).. Cet instrument a déjà été présenté à maintes reprises, avec une laser continu¹⁻³ ainsi qu'une variante utilisant un laser impulsif^{4,5}.

Rappelons que l'originalité de cet instrument vient du fait que le cristal photoréfractif enregistre l'hologramme in-situ, ne nécessitant donc pas de développement chimique (comme dans le cas des supports holographiques argentiques) ou de développement physique complexe (chauffage et chargement électrique prenant quelques dizaines de secondes comme dans le cas des thermoplastiques). De plus le cristal est complètement effaçable et réutilisable pour de multiples enregistrements holographiques successifs, et ce, sans fatigue du support. Nous avons montré que, à l'instar des instruments basés sur l'interférométrie de speckle, la caméra holographique photoréfractive permet une capture aisée avec une procédure de traitement simple, en un temps très court, mais avec une qualité des figures d'interférence supérieure puisque le speckle n'est pas présent dans les images. Cela permet d'accéder à des mesures de déplacements généralement plus fines. C'est bien le cas qui nous occupe car les échantillons dont nous devons mesurer le CTE ont des CTE prédits relativement petits (de l'ordre de 10^{-6}), ce qui signifie que les déplacements mesurés restent souvent inférieurs à une frange entière, pour des élévations de quelques degrés et des longueurs initiales de quelques centimètres.

II. Présentation de la caméra holographique

La figure 1 montre une photo de la caméra holographique. Cette dernière est une version compacte qui a été dérivée d'un instrument présenté à la référence ² qui consistait en un petit banc optique sur lequel tous les segments de l'interféromètre sont présents : laser, optiques de formation des faisceaux, cristal photoréfractif, caméra CCD. La caméra holographique compacte ne contient plus le laser, la lumière étant véhiculée par une fibre optique. L'ensemble se réduit donc à un cylindre contenant deux objectifs d'imagerie, le cristal photoréfractif et la caméra CCD. Sur le côté du cylindre se trouve un petit bloc contenant un séparateur de faisceau interposé à la sortie de la fibre. La partie du faisceau transmise par le séparateur passe au travers d'une lentille divergente pour éclairer l'objet, tandis que la partie réfléchie constitue le faisceau référence qui est envoyé sur le cristal. L'ensemble a un diamètre de 8 cm, une longueur de 25 cm et un poids de 1 kg.



Figure 1. Caméra holographique compacte.

Les performances de de cette version sont équivalentes à celle de la version non compacte sur banc optique, avec ici une flexibilité accrue et une portabilité nettement supérieure. Diverses applications ont déjà été présentées ⁶. Le principe de fonctionnement est le suivant. Au départ les faisceaux référence et objet sont présents tous deux au niveau du cristal inscrivant ainsi l'hologramme de l'objet. Le temps d'enregistrement est inversement proportionnel à l'intensité des deux faisceaux, principalement celle du faisceau référence car peu de lumière envoyée vers l'objet en revient au niveau du cristal. On peut donc moduler le temps de réponse en envoyant plus ou moins de lumière dans le bras référence. La lecture holographique s'effectue avec le faisceau référence qui va diffracter l'image de l'objet en direction de la caméra CCD, ainsi que le faisceau illuminant l'objet. On observe donc en permanence l'image diffractée par le cristal (reconstruction holographique, état de base) et l'image directement transmise au travers du cristal (état actuel). Ces deux images interfèrent de manière constructive si l'état actuel est identique à l'état de base enregistré (si l'objet ne bouge pas). Si à un instant donné, on déplace ou déforme l'objet, on observe directement une figure de franges (interférogramme) superposée à l'image de l'objet, la forme de ces franges étant liée à la différence de phase entre les fronts d'onde objet reconstruit et transmis. A ce moment, si l'objet est dans un état stable, un nouvel hologramme s'enregistre et efface le précédent. Les franges d'interférence disparaissent alors endéans le temps de réponse. Il est donc important de digitaliser l'interférogramme dans une mémoire d'images. De plus, on applique la technique du décalage de phase permettant un calcul aisé du déplacement. Elle consiste en l'acquisition de 4 images de la déformation mais décalées en phase l'une par rapport à l'autre au moyen d'un translateur piézoélectrique actionnant un miroir du bras référence durant la séquence d'acquisition. Le temps de réponse est généralement fixé à quelque secondes ce qui permet d'acquérir la séquence d'images sans difficultés.

Cet effacement durant la lecture holographique est la principale caractéristique de la caméra et, si elle constitue en soi un avantage (car ainsi l'instrument est réutilisable rapidement), elle peut être une contrainte dans certaines applications. Il faut aussi noter qu'une fois l'hologramme enregistré, il peut se garder pendant une durée dépassant un jour. Ces dernières remarques étaient importantes en regard de l'application qui nous intéresse ici, à

savoir la mesure du CTE. En effet, l'intervalle de temps entre l'écriture holographique à une température donnée et la lecture à une autre température peut s'avérer assez long. Il faut donc prévoir un dispositif d'obturation du laser lorsque le changement de température est en cours, afin de ne pas perturber l'hologramme inscrit.

III. Application à la mesure de CTE.

III.1. Principe

Le principe de base de la détermination du CTE est de mesurer la différence entre les déplacements subis, d'une part, par le dessus de l'objet et, d'autre part, la base sur laquelle celui-ci est posé et ce, lorsque l'ensemble a subi une variation de température. La caméra holographique est donc positionnée comme à la figure 2. Pour éviter les problèmes éventuels liés aux turbulences de l'air consécutifs à l'échauffement, ainsi que pour faciliter homogénéisation des changements de température, l'ensemble est placé dans une enceinte sous vide munie d'un hublot. Les moyens de chauffage sont multiples : une résistance chauffante collée sous la base et un radiateur cylindrique entourant la pièce.

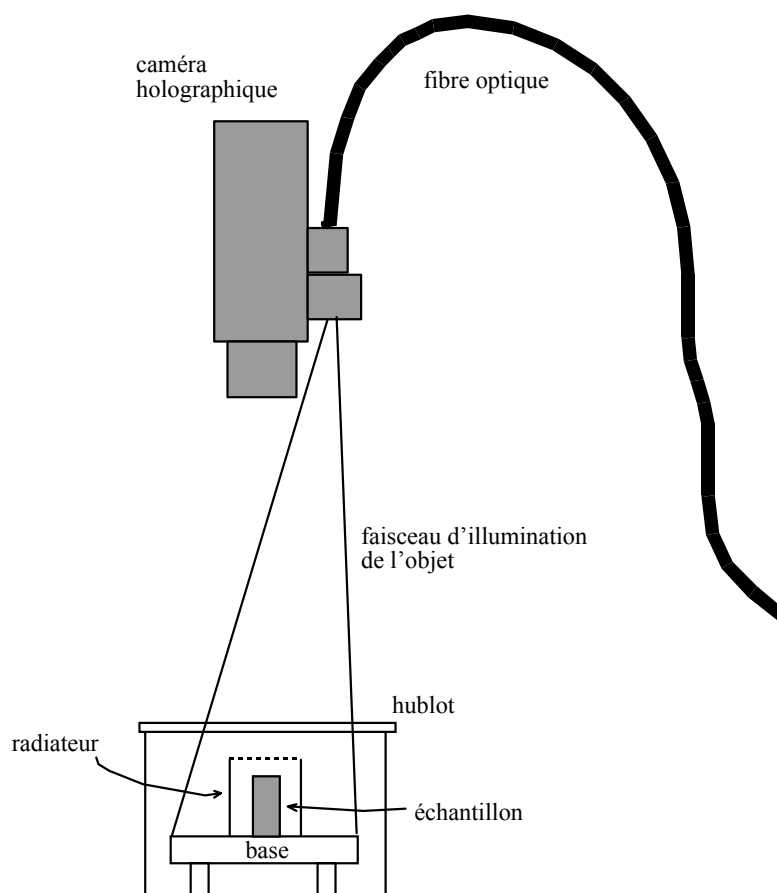


Figure 2. Schéma de principe du dispositif de mesure.

Différents modes opératoires peuvent être envisagés. Le plus simple consiste à enregistrer l'hologramme de l'objet à une certaine température. Ensuite on obture le faisceau laser, puis on élève la température de l'échantillon de ΔT et on stabilise celle-ci. A stabilisation, on ouvre l'obturateur du laser et on observe l'interférogramme montrant la différence de chemins optiques (entre l'objet et la surface de base) que l'on traduit en déplacement. La mesure interférométrique permet de discerner des différences de chemin optique inférieures à une frange d'interférence, soit moins de 266 nanomètres dans notre cas. En pratique, on n'est pas capable de discerner un déplacement d'une fraction de frange d'un déplacement de cette même fraction additionnée d'une ou plusieurs franges entières. Il faut donc prendre suffisamment de précautions pour rester dans une mesure de fraction de frange. Cela se fait en effectuant des observations préliminaires sur base d'un hologramme de référence qui est relu durant l'échauffement. Si on veut effectuer cette opération sur une période plus longue que le temps d'effacement de l'hologramme, on doit opérer une séquence de lectures successives sur des temps très courts, le

faisceau laser étant obturé entre ces instants. Cette opération permet de déterminer quel est le saut en température nécessaire pour des différences de déplacements d'une fraction observable de frange. En pratique, le système de régulation thermique utilisé permet des sauts en température contrôlés à 0.1°C près. La température est mesurée en différents endroits (sur la base, le radiateur et éventuellement sur l'objet lui-même).

La technique a été validée sur un échantillon d'aluminium dont le CTE est égal à $23 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. La figure 3 montre l'interférogramme du déplacement du dessus de l'échantillon (rectangle gris clair) et de la base (gris foncé). Ce type d'interférogramme en "teinte plate" est typique des mesures de CTE par holographie. Néanmoins dans la suite nous présenterons une autre technique d'observation consistant à ajouter des franges porteuses dans l'interférogramme. La valeur du CTE de l'aluminium déterminée par ces mesures est de $21 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. L'erreur de mesure d'environ 10% est gouvernée par la précision sur le saut en température ($\Delta T = 1^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$).

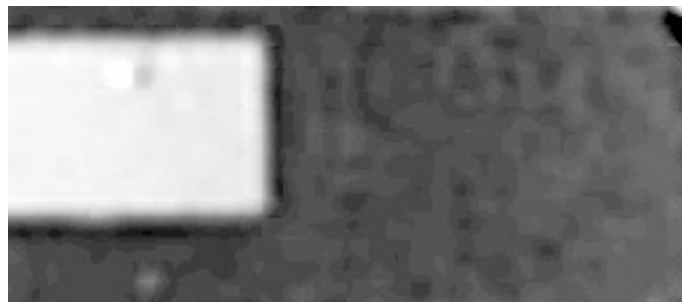


Figure 3. Interférogramme montrant le déplacement différent d'un parallélépipède d'aluminium et d'une plaque de base après un échauffement.

Nous allons maintenant présenter des mesures effectuées sur différents échantillons en fibre de carbone. L'industriel concepteur de cet élément nous a fourni une valeur calculée du CTE et nous devons déterminer le CTE réel afin de valider le modèle de calcul.

III.2. Premier cas : barreau simple

La figure 4 montre une vue schématique du barreau en fibre de carbone. Celui-ci est creux et, compte tenu du CTE prédit et de changements en température de l'ordre du degré, nous les avons coupé à une dimension de quelques centimètres. La face inférieure a été rectifiée pour optimiser le contact avec la base.

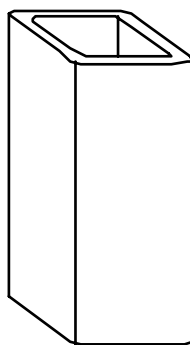


Figure 4. Schéma du barreau simple en fibre de carbone.

Afin d'obtenir une vision claire du déplacement du dessus (fine couronne à section carrée), nous avons opté pour une technique consistant à ajouter une série de franges porteuses dans l'image. Cela se fait en déplaçant l'objectif d'illumination de l'objet, entre l'instant de capture de l'hologramme de référence et le moment où l'on effectue la capture de l'interférogramme, après élévation en température. La figure 5(a) montre un exemple d'interférogramme où seule la porteuse est considérée ($\Delta T=0$ °C). Si on applique une variation de température, on obtient un décalage entre les franges de la porteuse sur l'objet et celles sur la base (figure 5(b)). Le décalage nous donne la contribution du déplacement de l'échantillon.

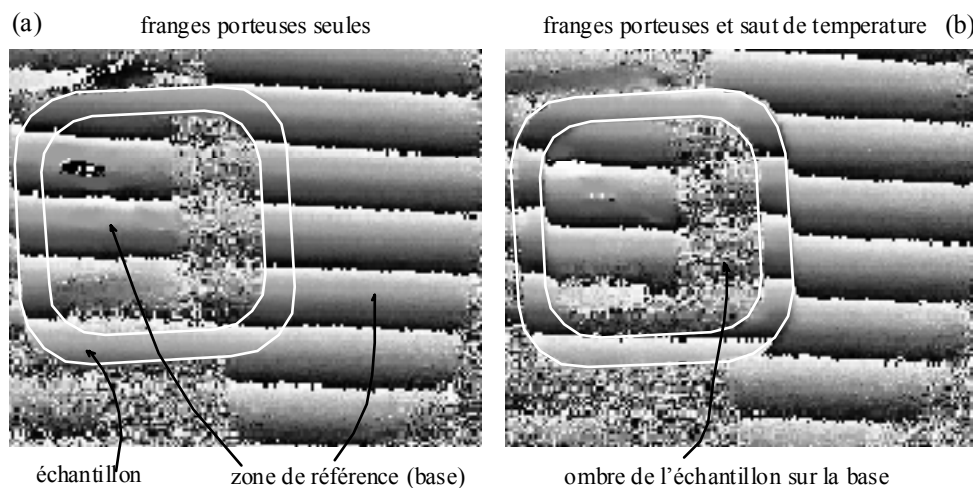


Figure 5. Interférogrammes de l'échantillon et la base. (a) porteuse seule, (b) porteuse et saut de température

III.3. Second cas : assemblage simple de 9 barreaux

Les résultats des premiers tests sur échantillons simples étant concluants, un cas plus compliqué nous a été proposé et consistait en un assemblage de 9 barreaux schématisé à la figure 6.

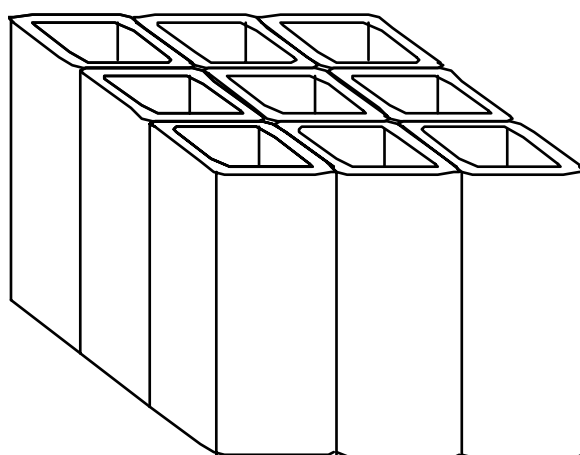


Figure 6. Schéma de l'assemblage de 9 barreaux

Il était demandé de mesurer le CTE de l'ensemble dans une direction transverse. Des essais préliminaires nous ont montré que les déplacements étaient supérieurs à une frange pour des élévations de l'ordre du degré, ce qui était conforme aux prédictions du CTE dans cette direction et compte tenu de la dimension transverse.

La procédure utilisée pour les barreaux simples (palliers en température contrôlés) n'était donc pas applicable, vu la limitation de notre système de régulation thermique : des sauts de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ contrôlés à $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ étaient irréalisables. Dès lors, nous avons envisagé la technique suivante. Sur base d'un hologramme enregistré à une température donnée, nous observons les interférogrammes à différents instants pendant la variation de température. La lecture est donc séquentielle et montre la différence entre l'état de l'objet à l'instant de lecture et l'état de référence. La variation thermique est cette fois très lente, de manière à obtenir une élévation de température de l'ordre de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur 1 heure. En fait, on ne contrôle pas véritablement l'élévation de température, on se contente plutôt de demander au système thermique de légères augmentations de température et on mesure en permanence celle-ci. On capte alors les images à chaque variation de $1/10^{\text{ème}}$ de degré, par exemple. Par facilité, on peut aussi travailler en descente en température : on porte l'ensemble à une température élevée que l'on stabilise, on enregistre l'hologramme et puis on coupe l'alimentation en chauffage. La température redescend lentement et on effectue la séquence de mesure. Entre les différents instants de capture (avec décalage de phase), on obture le faisceau laser afin de ne pas trop perturber l'hologramme inscrit. La figure 6 montre une telle série de mesure. On reconnaît un l'objet qui est l'ensemble montré à la figure 5 couché sur un de ses flancs et observée par le dessus. La différence de déplacement est mesurée en deux points proches du champ observé, l'un sur le dessus de l'objet, l'autre sur la base (marqués par une croix dans la sous-image 1). Il est essentiel avec la méthodologie adoptée ici de ne pas "perdre" une frange. Il faut donc que la vitesse de déplacement du dessus de l'objet soit suffisamment lente ou alors augmenter l'échantillonnage temporel. Cela peut être le cas lorsque l'on démarre un échauffement : on remarque souvent une montée abrupte de la température sur l'échantillon. Dès lors, les résultats les plus fiables sont ceux obtenus en laissant l'ensemble se refroidir.

Vu la taille importante de l'objet et sa construction, il était difficile de rectifier la face de contact avec la base pour optimiser le contact thermique, comme dans le cas du barreau simple. Dès lors, seul le radiateur entourant l'objet a été utilisé afin d'avoir un chauffage relativement homogène. On remarque dans la série de mesures à la figure 7 que l'objet ne se déplace pas de manière homogène partout. Cela est dû à des inhomogénéités internes du matériau. Plusieurs essais ont été effectué (montée et descente en température) et qui ont montré le même comportement. On ne pouvait donc pas déduire un CTE unique pour cet échantillon.

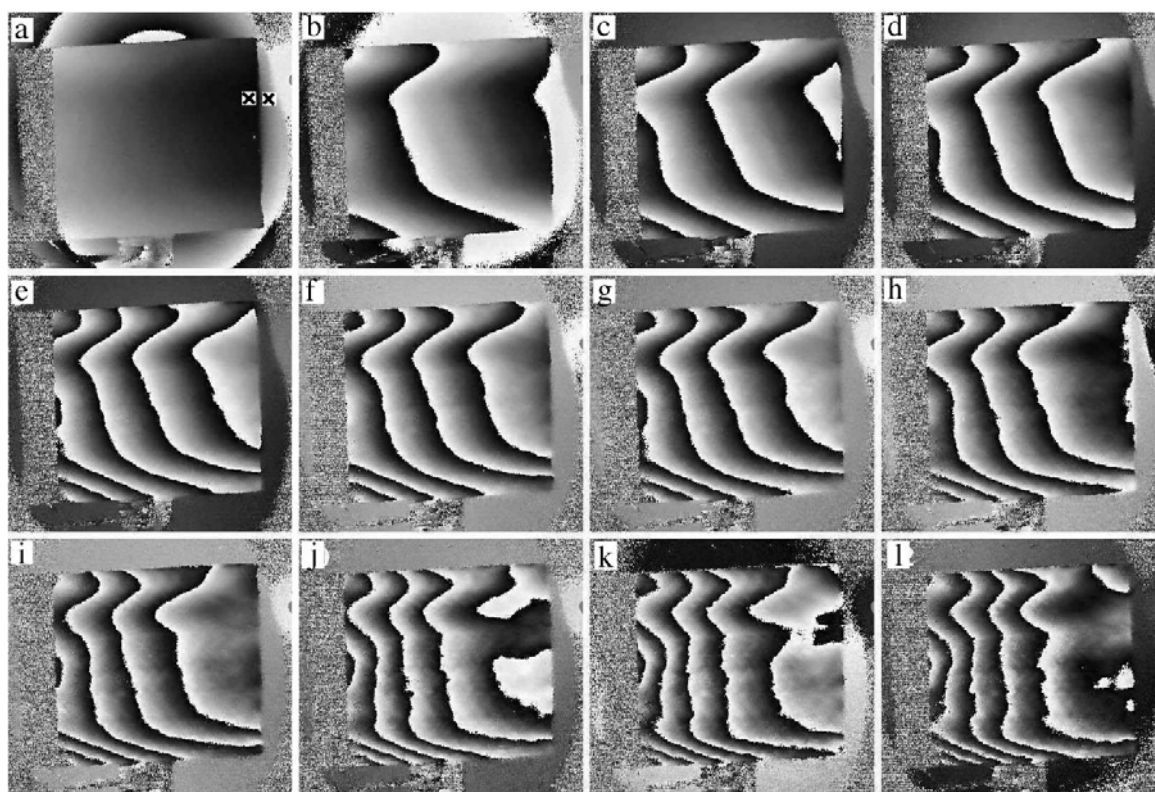


Figure 7. Série de mesure de déformation lors d'un changement de température.

Cette déformation n'est pas un artéfact de mesure (dû à une éventuelle inhomogénéité de chauffage, p.ex.). Elle est reproductible sous différentes conditions expérimentales (sous vide, à l'air, chauffage par conduction via la base, chauffage par radiation uniquement,...). Pour en avoir la preuve, nous avons simplement effectué la mesure avec l'échantillon tourné de 180° (avec la même face observée). La déformation trouvée est exactement la même, mais tournée de 180° . Elle est donc liée à l'objet.

Ces résultats montrent l'intérêt évident d'utiliser la méthode holographique pour la mesure du CTE comparativement à des mesures ponctuelles. En effet, suite à ces résultats relativement inattendus, l'industriel a revu sa méthode de préparation des échantillons. Les échantillons qui ont suivi ceux-ci n'ont plus montré ce comportement.

III.4. Troisième cas : assemblage complexe de barreaux

Le troisième cas concerne un assemblage complexe de barreaux creux et de pièces métalliques. Les CTE prédits sont importants (de l'ordre de 10^{-5}) et les longueurs d'objet importantes (15 cm). Dès lors, la technique en paliers d'environ 1° nous amènerait beaucoup trop de franges. Nous nous sommes d'emblée tourné vers une méthode de suivi lors d'une descente en température. Contrairement au cas précédent, nous travaillerons par enregistrement et lecture successives. A une température donnée, on enregistre l'hologramme (temps d'enregistrement de quelques secondes). On laisse la température dériver, le laser est alors obturé, et lorsqu'une variation d'un 1/10ème de degré, voire moins, est mesurée (par des thermocouples collés sur l'objet), on opère une lecture holographique. Immédiatement après la lecture, on laisse un nouvel hologramme s'enregistrer. On effectue ainsi une série de mesure et on accumule les différents résultats de déplacement.

Il faut bien sûr que le déplacement de l'objet soit négligeable sur le temps durant lequel on effectue la mesure et l'enregistrement consécutif (l'ensemble prenant environ 10 secondes). Néanmoins cette erreur est marginale dans les cas qui nous occupent car nous travaillons en descente en température et que l'inertie thermique de l'objet est assez importante. La figure 8 montre les températures mesurées en deux points de l'objet, l'un proche de la base (T_{base}) l'autre proche du haut (T_{haut}). L'intervalle de temps durant lequel la série de mesure a été prise est délimité par les deux traits pointillés verticaux. La figure 9 montre une série d'interférogrammes captés durant la descente en température.

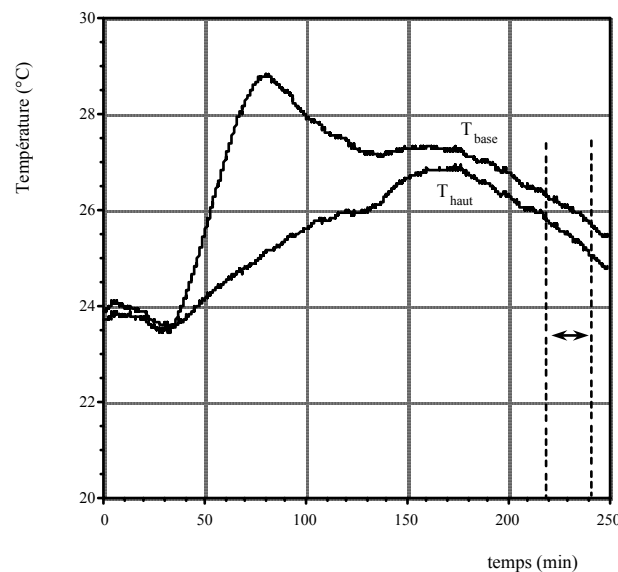


Figure 8. Courbe des températures au sommet et à la base de l'objet

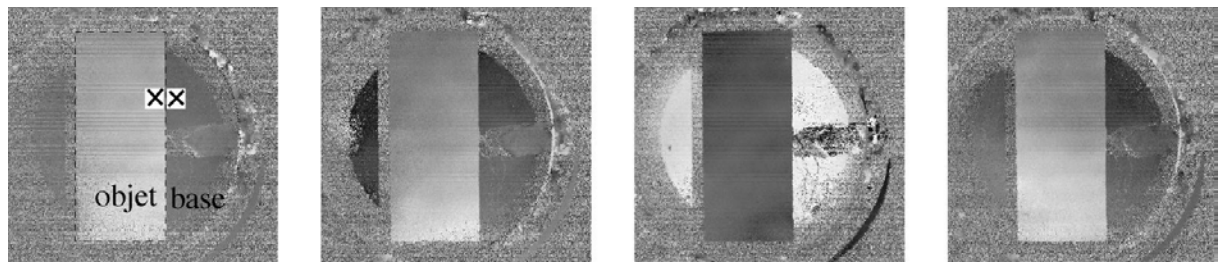


Figure 9. Quelques mesures interférométriques de déplacement entre l'objet et la base. Les points de comparaison sont repérés par des croix.

IV. Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible de déterminer le coefficient de dilatation thermique sur base de mesure de déplacement différentiel entre le dessus d'un objet et la base sur laquelle celui-ci est posé. L'instrument utilisé est une caméra holographique dynamique, réutilisable indéfiniment. Celle-ci permet d'obtenir des cartes de déplacement de haute définition, sans bruit de speckle (pas besoin de filtrage de l'image) et donc de grande précision.

Différents cas de mesures ont été traités avec différentes méthodologies. La première et la plus simple consiste à observer les déplacements entre deux températures stabilisées et mesurées avec précision. Cette méthode s'applique au cas où les déplacements sont faibles. Il faut, en effet, mesurer une fraction de frange d'interférence et s'assurer que l'on n'a pas cette fraction de frange additionnée d'une ou plusieurs franges entières qu'on ne peut discerner. La seconde façon de travailler permet d'éviter ce problème et s'applique aux cas où les déplacements sont trop importants. Comme il est difficile d'assurer des régulations thermiques meilleures que 0.1 °C (avec du matériel relativement classique et dans des conditions de travail pas trop draconiennes), il faut donc trouver une méthode de travail alternative. La solution est de laisser refroidir l'objet lentement et de mesurer sa température. On peut alors effectuer des mesures sur des écarts de température très petits pour lesquels on observe une fraction de frange.

Ces différentes méthodologies ont montré qu'elles donnent des résultats de bonne qualité avec une précision de l'ordre de 10%, la plus grande partie de l'imprécision provenant de la connaissance de la température. Cette précision est d'autant meilleure que le CTE à mesurer est petit puisqu'alors on peut se permettre des écarts de température plus grands.

Enfin, un des grands avantages de la technique holographique est la possibilité d'observer des comportements inhomogènes dans le matériau comme dans le deuxième cas présenté. Cette information inattendue a été bénéfique pour la fabrication de l'échantillon qui a pu être optimisée.

References

- [1] Ph. Lemaire, M. Georges, "Les cristaux photoréfractifs de type sillénite comme support d'enregistrement en interférométrie holographique: originalités, potentialités et applications", Conférence invitée, *9ème séminaire SFO/HOLO3 : Les Applications Industrielles de l'Holographie et des Techniques Connexes*, Saint-Louis, 21-22 Novembre 96.
- [2] M.P. Georges and Ph.C. Lemaire, "Real-time holographic interferometry using sillenite photorefractive crystals. Study and optimization of a transportable set-up for quantified phase measurements on large objects", *Appl. Phys. B*, Vol 68, pp. 1073-1083 (1999)
- [3] Ph. C. Lemaire, V. S. Scaufaire, M. P. Georges, " Userfriendly and compact holographic camera based on photorefractive crystals. Applications in high accuracy metrology, *IntSL 2000*, Lausanne, 25-28 Sept. 2000

- [4] Marc P. Georges, Gilles Pauliat, Philippe C. Lemaire, Gérald Roosen, "Interférométrie holographique avec cristaux photoréfractifs en régime impulsionnel. Développements et résultats préliminaires", *10e séminaire SFO/HOLO3 : Nouveaux moyens optiques pour l'industrie*, Bordeaux, France, 18-19 November 1998
- [5] Marc Georges, Cédric Thizy, Philippe Lemaire, Gilles Pauliat, Gérald Roosen, "Mesure de vibrations par holographie dynamique multi-expositions", *Actes du premier colloque francophone de la SFO : Méthodes et techniques optiques pour l'industrie*, Biarritz, 21-24 Nov 2000, p25-30
- [6] Marc P. Georges, Véronique S. Scaufaire, Ph. C. Lemaire, "Compact and portable holographic camera using photorefractive crystals. Application in various metrological problems", *Appl. Phys. B* 72, p. 761-765 (2001)